

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：93901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04222

研究課題名（和文）機械学習を応用した複雑システムの最適制御技術

研究課題名（英文）Optimal control technology for complex systems by applying machine learning

研究代表者

伊藤 優司（Ito, Yuji）

株式会社豊田中央研究所・量子デバイス研究領域・なし

研究者番号：10613565

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、複雑な対象を表現可能なデータ駆動型モデルに対する制御理論の構築を目的として取り組んだ。ガウス過程等の非線形性と不確かさを表現可能な機械学習モデル、確率パラメータをもつ非線形システムに対して、安定性や統計的制御性能を考慮した解析・制御設計手法を構築した。また、様々な不確かさを表現可能な線形確率システムに対する安定性解析や制御設計手法の構築も行い、これらは非線形系への拡張が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械学習の発展によりガウス過程等のデータ駆動型モデルが注目されており、そのようなモデルを用いて制御則を設計する試みがされている。しかしながら、データ駆動型モデルは高い表現力と代償に複雑な関数で構成されているため、従来の制御理論を用いても統計的最適性や安定性を保証した制御則を設計する事は困難である。本研究で構築した理論はこの問題を解決するための手法であると共に、今後の更なる発展が期待される。また、個体差が大きく外乱にも弱いナノスケルデバイス等、非線形特性や不確かさ（ばらつき）をあわせ持つ複雑な対象を制御する要求に対して、本研究成果の活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop fundamental control theories for data-driven models that can represent complex systems. For data-driven models, such as Gaussian processes, and nonlinear stochastic systems that can express nonlinearity and uncertainty, we developed methods to analyze stability and/or design controllers improving statistical control performance. In addition, we developed methods for stability and/or control of linear stochastic systems that can express various uncertainties, which are expected to be extended to nonlinear stochastic systems.

研究分野：制御工学

キーワード：データ駆動型制御 確率最適制御 機械学習

1. 研究開始当初の背景

非線形特性や不確かさ(ばらつき)をあわせ持つ複雑な対象を制御する要求が日々増加している。例えば、自動車ドライバの操作支援、個体差が大きく外乱にも弱いナノスケールデバイスの制御等、多岐に渡る。所望の目的に対して、これらの対象を最適かつ安定に操る制御則を設計するためには、対象の複雑な振る舞いを正確に表現できる数理モデルが必要となる。近年、機械学習の発展によりガウス過程等のデータ駆動型モデルが注目されており、対象の振る舞いが複雑であっても事前に観測したデータから直接的にモデル化が可能になりつつある。これにより、データ駆動型モデルを用いて制御則を設計する試みがされている。しかしながら、データ駆動型モデルに対して統計的に最適かつ安定性を保証した制御則を設計する事は未だ困難である。データ駆動型モデルは高い表現力と代償に複雑な関数で構成されているため、既存の制御理論を適用しても制御則を正確に設計する事は困難であり、統計的最適性や安定性は保証されず実用上問題となる。これを解決するためには、データ駆動型モデルに対応できる柔軟な制御理論を整備する必要がある。そのような理論の構築に向け、2014年度より研究代表者らはデータ駆動型確率制御の検討を行っている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非線形特性と不確かさを表現可能なデータ駆動型モデルに対して、平均制御コストを最小化する意味で統計的に最適かつ安定性を保証した制御則を設計する事である(図1)。このような制御則の設計が可能になれば、ナノスケールデバイスの制御等の様々な応用に対して、高い性能と安定性を保証した制御の実現が期待される。

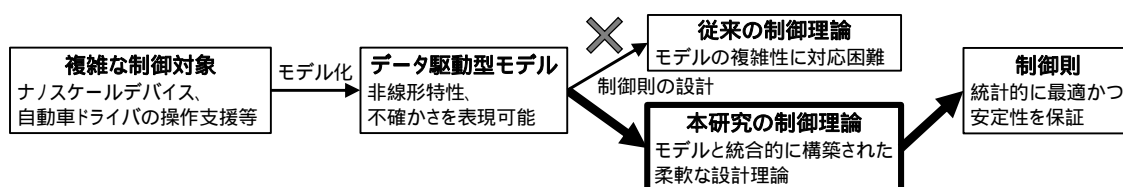


図1: 本研究の目的。従来の制御理論では扱えなかったデータ駆動型モデルに対して、(平均制御コスト最小化の意味で)統計的に最適かつ安定な制御則を設計する理論の構築を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、非線形性と不確かさを同時に表現できるデータ駆動型モデル(ガウス過程モデル、確率パラメータをもつ非線形モデル等)を対象とする。研究代表者らがこれまで検討してきたデータ駆動型確率制御を基盤に、主に以下の三項目(1)(2)(3)を検討する事で本研究目的の達成を目指す。

(1) 統計的最適制御則の設計

モデルの不確かさ(ばらつき)が各時刻で独立であると限定した場合には、リッカチ方程式、Hamilton-Jacobi-Bellman(HJB)方程式を用いた解法を拡張する事で、平均制御コストを最小化する統計的最適制御則を設計できる事が知られている。しかしながら、本研究で扱うモデルの様に不確かさが時間依存性を持つ一般的な場合には適用困難である。また、制御対象が非線形の複雑なモデルで表現されている場合、HJB方程式を解くことさえも困難となる。そこで本項目では、データ駆動型モデルに対する統計的最適制御問題の近似解法や適切な緩和法を検討する。

(2) 制御則の安定領域判別

状態空間内におけるシステムモデルの安定領域を判別するためには、状態空間内の全状態、即ち無限通りの状態に対して安定性条件を調べる必要があり、特定のモデルを除き一般に困難である。これを解決するため本項目では、データ駆動型モデルにある制御則を適用した際の安定領域の判別方法を検討する。

(3) 線形確率システムに対する解析結果の拡張

線形システムに対して整備された制御理論を非線形システムへ拡張する方針は制御工学分野においても多く成功している。本研究も同様に、線形確率システムに対して理論を構築できれば、非線形確率システムへの拡張も期待できる。そこで、複雑な確率パラメータ表現や複雑な制御方策に関しては、線形確率システムに対する理論構築から取り組む。

4. 研究成果

下記に代表的な研究成果(1)(2)(3)を記す。

(1)カーネルベースドモデルに対するロバスト非線形最適制御[1]

ガウス過程やカーネルリッジ回帰等で用いられているカーネルベースドモデルは複雑な関数で構成されているため、モデルに基づく制御設計が困難である。そこで本研究では、制御則を容易に設計可能な新しいカーネルベースドモデルと制御設計手法を提案した。最適制御則やロバスト制御則を設計する際、ある非線形偏微分方程式を解く事ができれば制御則を解析的に得られるが、その方程式は多くの場合に求解困難である。そこで本研究では、偏微分方程式を解析的に解けるようなカーネルベースドモデルとモデルパラメータに関する条件を導出した。この条件を満たすようにモデルを学習する事で、対応する偏微分方程式は解析的に解かれ、制御則が同時に得られる。尚、カーネルベースドモデルは確定的な非線形モデルであるが、制御対象の不確かさ(モデル化誤差)を外乱とみなすことで、不確かさも考慮したロバスト制御則が設計できる。提案手法の有効性を評価するため、ある外乱の下で対象を提案手法により制御するような数値シミュレーションを実施した。その結果、外乱により対象の状態変数は一時的に原点から離れるものの、提案制御則により原点に収束している事が確認できた。また、安定性に関する不等式条件も数値的に検証した。その結果、特定の領域内から制御を開始した場合は、その内部の別の領域に収束する事を数値的に確認した。尚、本研究では状態領域上の全ての点に対して不等式条件を保証せずに、微小間隔で配置されたグリッド点上の状態変数に対して条件を保証しており、その意味で数値的な保証としている。全ての状態に対して厳密に保証する方針については以下の成果(2)を参照されたい。

(2)ガウス過程モデルに対する安定性の解析[2]

研究代表者らが従来構築したデータ駆動型確率制御の一手法では、ガウス過程でモデル化されたシステムの安定性を保証する際、モデルの分散項(不確かさ)を考慮できていない問題があった。そこで本研究では、分散項も含めたガウス過程モデルに対しても確率的安定性を保証できる手法を構築した。ここで確率的安定性とは、ある確率以上でシステムの状態変数 x が原点近傍に到達する性質を意味する。この確率的安定性を評価するには、状態変数の制御コストに相当する関数を設計し、その関数に基づく安定性条件式を各状態変数に対して調べればよい。無限通りの値をとる状態全てに対して条件式を調べつくすことは一般に困難であるため、一定間隔でサンプリングした有限個の状態に関する別の不等式に緩和する。この時、ガウス過程モデルの不確かさによる影響を適切に不等式に加えることで、モデルの不確かさが含まれていても不等式による緩和が可能となる。最終的に、有限個の不等式条件を満たすことで安定性が保証可能となる。

(3)時変確率パラメータと時不変確率パラメータが混在したシステムの安定化制御[3]

複雑に振る舞うシステムは、環境変化やノイズ等によって生じる時変のばらつきと、個体差等によって生じる時不変のばらつきを同時に含む場合がある。このようなシステムを安定して動作させるためには、時変・時不変のばらつきをそれぞれ確率的なパラメータとして扱ったシステムの安定性を保証する事が望ましい。そこで本研究では、時変・時不変の確率パラメータをもつ線形システムに対して安定性を保証可能な制御則を設計する手法を構築した。提案手法では、システムの状態変数に対して時変確率パラメータに関する二次モーメントベクトルを考え、これを新たな状態変数とした拡大系を構築する。この拡大系は時不変確率パラメータのみを含む線形システムとして表現されるため、既存のポリトープシステムの解析手法が応用可能となる。これにより、ある決定変数ベクトルに関して二次の行列不等式を解くことで、線形フィードバック型の安定化制御則が設計可能となる。

参考文献

[1] Y. Ito, K. Fujimoto and Y. Tadokoro, "Kernel-Based Hamilton-Jacobi Equations for Data-Driven Optimal and H-Infinity Control," in IEEE Access, vol. 8, pp. 131047-131062, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009357.

[2] Y. Ito, K. Fujimoto and Y. Tadokoro, "Sampling-Based Stability Evaluation with Second-Order Margins for Unknown Systems with Gaussian Processes," 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC), 2019, pp. 3471-3477, doi: 10.1109/CDC40024.2019.9029790.

[3] Y. Ito and K. Fujimoto, "On Design of Stabilizing Controllers Using Compression Operators for Linear Systems with Time-Varying and Time-Invariant Stochastic Parameters," 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2020, pp. 4262-4267, doi: 10.1109/CDC42340.2020.9304117.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 ITO Yuji, FUJIMOTO Kenji	4. 巻 E105.A
2. 論文標題 Kernel-Based Hamilton-Jacobi Equations for Data-Driven Optimal Control: The General Case	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2021EAI0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuji Ito, Kenji Fujimoto, Yukihiro Tadokoro	4. 巻 8
2. 論文標題 Kernel-Based Hamilton--Jacobi Equations for Data-Driven Optimal and H-Infinity Control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 131047-131062
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.3009357	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuji Ito, Keita Funayama, Jun Hirotsu, Yutaka Ohno, Yukihiro Tadokoro	4. 巻 7
2. 論文標題 Stochastic Optimal Control to Minimize the Impact of Manufacturing Variations on Nanomechanical Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE ACCESS	6. 最初と最後の頁 171195-171205
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2955697	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 村松歩武, 伊藤優司, 藤本健治, 丸田一郎
2. 発表標題 線形確率系に対する制御性能を考慮した安定確率最大化について
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuji Ito, Kenji Fujimoto
2. 発表標題 On Design of Stabilizing Controllers Using Compression Operators for Linear Systems with Time-Varying and Time-Invariant Stochastic Parameters
3. 学会等名 2020 IEEE 59th Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Ito, Kenji Fujimoto
2. 発表標題 On Optimal Control with Polynomial Cost Functions for Linear Systems with Time-Invariant Stochastic Parameters
3. 学会等名 2021 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 優司
2. 発表標題 ガウス過程モデルを用いたフィードバック制御則の設計
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会 SICE企画セッション (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 洸介, 伊藤 優司, 藤本 健治, 丸田 一郎
2. 発表標題 確率パラメータを含む線形システムの定数フィードバック制御による安定確率最大化
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 洸介, 伊藤 優司, 藤本 健治, 丸田 一郎
2. 発表標題 線形確率システムの動的フィードバック制御による安定確率最大化について
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuji Ito, Kenji Fujimoto, Yukihiko Tadokoro
2. 発表標題 Sampling-Based Stability Evaluation with Second-Order Margins for Unknown Systems with Gaussian Processes
3. 学会等名 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤優司
2. 発表標題 ガウス過程モデルを用いたフィードバック制御則の設計
3. 学会等名 SICE 制御部門 データ科学とリンクした次世代の適応学習制御調査研究会 第3回講義会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Ito, Kenji Fujimoto
2. 発表標題 Stability Analysis for Linear Systems with Time-Varying and Time-Invariant Stochastic Parameters
3. 学会等名 21st IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Ito, Kenji Fujimoto, and Yukihiro Tadokoro
2. 発表標題 On Optimal Control Based on Parametric Gradient Approximations for Nonlinear Systems with Stochastic Parameters
3. 学会等名 2019 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤本 健治 (Fujimoto Kenji) (10293903)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田所 幸浩 (Tadokoro Yukihiro) (20446959)	株式会社豊田中央研究所・量子デバイス研究領域 (93901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------